

# 基于多分辨分析的高炉铁水含硅量 波动多重分形辨识<sup>\*</sup>

罗世华<sup>1)†</sup> 曾九孙<sup>2)</sup>

1) 江西财经大学信息管理学院, 南昌 330013)

2) 浙江大学数学系, 系统优化技术研究所, 杭州 310027)

(2008 年 6 月 19 日收到, 2008 年 8 月 8 日收到修改稿)

以包钢 6 号高炉、邯钢 7 号高炉和莱钢 1 号高炉在线采集的铁水含硅量 $[Si]$ 的时间序列为样本, 利用多分辨分析剔除样本的长期趋势, 对样本保留的波动趋势进行多重分形特征辨识. 通过计算广义 Hurst 指数、尺度函数、多重分形谱, 全面、细致量化了序列的局部及不同层次的波动奇异性. 计算结果表明: 去除长期趋势后, 三座高炉 $[Si]$ 序列的波动呈现显著多重分形特征, 这样的波动过程仅用单一的 Hurst 指数或 box 维数来描述是不够的.

关键词: 多分辨分析, 铁水含硅量, 波动, 多重分形

PACC: 0555, 0540

## 1. 引 言

高炉冶炼过程是一个在高温、高压下进行的复杂非线性过程, 炉内时刻发生着上百种化学反应, 并且这些反应是在流体动力学、工业反应动力学条件下的动态反应, 与实验室条件下的静态反应差别巨大<sup>[1]</sup>. 在高炉炼铁工艺中, 通常以铁水含硅量 $[Si]$ 反映高炉炉缸的物理温度, 简称炉温, 由于铁水 $[Si]$ 的控制与高炉冶炼过程的炉况稳定性、生产效率(利用系数)、能耗(比)和铁水质量 $[S]$ 之间关系密切, 故把它作为冶炼过程控制的重要指标. 近年来, 国内外多个研究团队先后设计出多种基于随机过程的炉温预报算法, 但由于炉温波动的高度复杂性, 已有的模型尚无法彻底解决这一预报难题<sup>[2-8]</sup>.

为了找到现有大量炉温 $[Si]$ 预报算法效果不理想的根源, 我们的研究团队开始深入讨论炉温波动的本质特征, 通过计算 $[Si]$ 序列的 Hurst 指数、box 维数、功率谱分析等方法, 发现该序列表现出显著分形特征<sup>[4,9]</sup>, 序列有别于随机时间序列. 但是这些探索本质上是对铁水硅 $[Si]$ 序列的单分形结构进行了研究, 即用一个简单、唯一的参数(如 Hurst

指数、分形维等)刻画出时间序列的分形特征. 单分形结构研究的是炉温波动的长期统计行为, 只描述波动的宏观概貌, 并没有考虑该炉温发展在某一时刻的局部特性或不同层次、不同局域条件形成的各种复杂的精细结构. 然而对于实际生产过程, 炉温变化的不规则性或奇异性常常随时间和其他一些条件的变动而变动, 如何刻画 $[Si]$ 序列的细节分形特征, 我们借助 Grassberger 等人提出多重分形理论对炉温局部波动特征进行过初步的研究<sup>[10]</sup>. 研究结果表明小高炉的炉温波动呈现非常显著的多重分形特征, 但大高炉炉温波动的局部奇异性在已有的辨识框架下表现得比较模糊. 这是否就意味着大高炉的炉温波动就不存在局部奇异性? 装备现代化的大高炉依然无法实现闭环控制的现实提醒我们, 改进或寻找新的灵敏度更高的多重分形分析方法, 是当前回答这个问题的最好努力方向.

本文选取由浙江大学系统优化技术研究所开发的“高炉专家系统”在线采集数据: 包头钢铁集团公司 6 号高炉(2500m<sup>3</sup>)2007 年 4—6 月份的 $[Si]$ 序列(容量为 840 炉数据), 邯钢钢铁集团公司 7 号高炉(2000m<sup>3</sup>)2004 年 10—12 月份的 $[Si]$ 序列和山东莱芜钢铁公司 1 号高炉(750m<sup>3</sup>)2002 年 2—4 月份的 $[Si]$ 序列为样本空间(容量均为 1000 炉数据). 通过

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 60775038, 10701040), 江西省教育厅科技项目(批准号: GJJ08358, GJJ08359)和江西财经大学青年基金资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: luoshihua110@yahoo.com.cn

多分辨小波分析剔除样本长期趋势,对序列的波动成分,在新的框架下计算其广义 Hurst 指数、多重分形谱等具有时变性质的参数,来表征炉热状态的多重分形特征,即炉温变化的局部不规则性或奇异性。仿真结果表明:对于 2000 多立方容积的大高炉,其  $S_i$  序列波动也具有明显多重分形特征,炉温的波动局部奇异性不一致,说明高炉炉温变动过程是一个多重分形过程,这一结果有重要的理论和应用价值。将量化的多重分形特征与现有相关预报模型相结合,有望设计出基于炉温波动本质特征的新型炉温预报模型。

## 2. 多分辨分析提取 $S_i$ 序列波动特征

为了消除序列不平稳带来的影响,我们首先对原始  $S_i$  序列  $S[n], n = 1, 2, \dots, N$  进行如下对数化处理,得到所谓的“对数增益序列”:

$$X(n) = [\ln(S[n+1]) - \ln(S[n])] / \sigma, \quad n = 1, 2, \dots, N-1, \quad (1)$$

其中  $\sigma$  为序列  $S[n]$  的标准差,再构造  $X(n)$  的“累计轮廓序列”<sup>[11,12]</sup>

$$P(n) = \sum_{t=1}^n X(t), n = 1, 2, \dots, N-1. \quad (2)$$

图 1 给出了三座不同容积高炉  $S_i$  序列样本以及预处理后得到的相应“累计轮廓序列”。对序列  $P(n)$ ,通过多分辨小波变换将信号波动成分和长期趋势成分剥离开来。本文选择 Db 小波对其进行不同尺度水平下的小波分解,然后抛弃高通系数仅用分解出来的低通系数进行重构,获取序列  $P(n)$  的长期趋势信号  $I(n)$ ,再将  $P(n)$  与  $I(n)$  作差,即可得到序列的波动成分

$$Y(n) = P(n) - I(n), n = 1, 2, \dots, N-1. \quad (3)$$

图 2 给出了三座高炉样本的长期趋势信号  $I(n)$  图(选择 Db-8 小波进行多分辨分解到第 3 层,然后仅用分解的低通系数重构)以及根据(3)式提取出来的序列的波动成分  $Y(n)$  (为了能清晰显示,图中保留了样本 20% 的信息)。据此,就可以通过对序列  $Y(n)$  的分析,来了解炉温波动的局部奇异性、不同层次的波动奇异性存在与否,即进行多重分形结构辨识。

## 3. 多重分形分析

对于一个已经证明具有单分形特征的过程,进一步检验该过程是否具有多重分形特征,本质上是通过计算一些广义分形参数来刻画过程的局部分形特征,如果这些参数具有时变或域变特性,说明过程具有多重分形性质,表现出比理想单分形过程更加复杂和不规则的波动特点。下面给出我们将要检验的主要广义分形参数<sup>[13-16]</sup>。

### 3.1. 尺度函数

定义 1 若过程  $\{X(t), t \in T\}$  具有平稳增量且满足

$$E(|X(t+\Delta t) - X(t)|^q) = c(q)(\Delta t)^{\tau(q)+1}, \quad \forall t \in T, q \in Q, \quad (4)$$

则称  $X(t)$  是一个多重分形过程。其中  $\tau(q)$  常称为多重分形过程的尺度函数或质量指数,  $\tau(q)$  是分形行为的一个重要刻画指标,对于多重分形过程,  $\tau(q)$  是关于  $q$  的非线性函数,若  $\tau(q)$  关于  $q$  是线性的,则(4)式描述的多重分形过程就退化成单分形过程。

(4)式表明,不同时间增量  $\Delta t$  的尺度幂律关系是一样,也就是满足标度不变性,这是分形的基本特征。多重分形的本质是描述分形过程的局部奇异性,在不同时点上,若序列波动幅度不一样,对不同幅度的波动进行幂次方运算,相当于对波动的波幅进行放大或缩小,因此,大波动变得更大,小波动变得更小,从而加以区分开来。

### 3.2. 广义 Hurst 指数

Hurst 受爱因斯坦在布朗运动研究方面的工作结果(爱因斯坦发现一个随机游走的粒子走过的轨迹与间隔时间的平方根成比例,即  $R = T^{0.5}$ )的启发,提出了重标极差值与序列标度  $n$  存在一个指数  $H$  的变化比例,即  $(R/S)_N = CN^H$ ,  $C$  为某一常数,  $N$  为序列长度。延续这样一种思想,联系多重分形过程的定义 1,定义广义 Hurst 指数  $H(q)$

$$\{E(|X(t+\Delta t) - X(t)|^q)\}^{1/q} = c(q)(\Delta t)^{H(q)}. \quad (5)$$

对比(4)和(5)式不难发现,广义 Hurst 指数  $H(q)$  与尺度函数  $\tau(q)$  之间的关系为

$$H(q) = [\tau(q) + 1] / q. \quad (6)$$

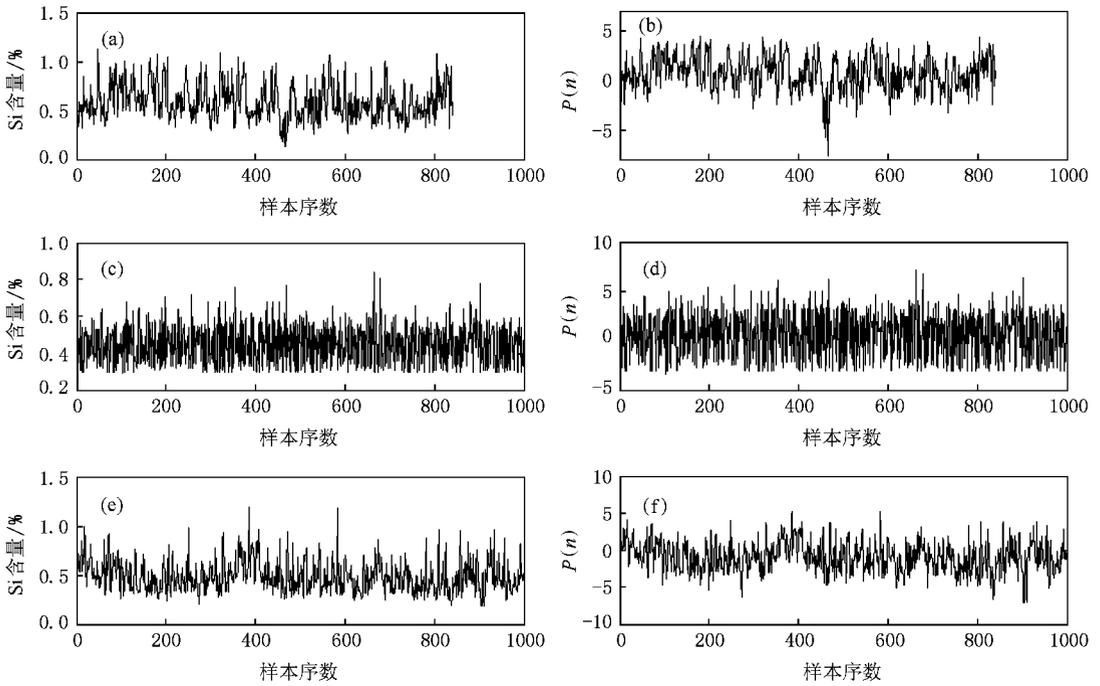


图 1 (a)(c)(e)分别为包钢、邯钢、莱钢 Si 原始时间序列 ;(b)(d)(f)分别为三座高炉样本序列的“累计轮廓序列”

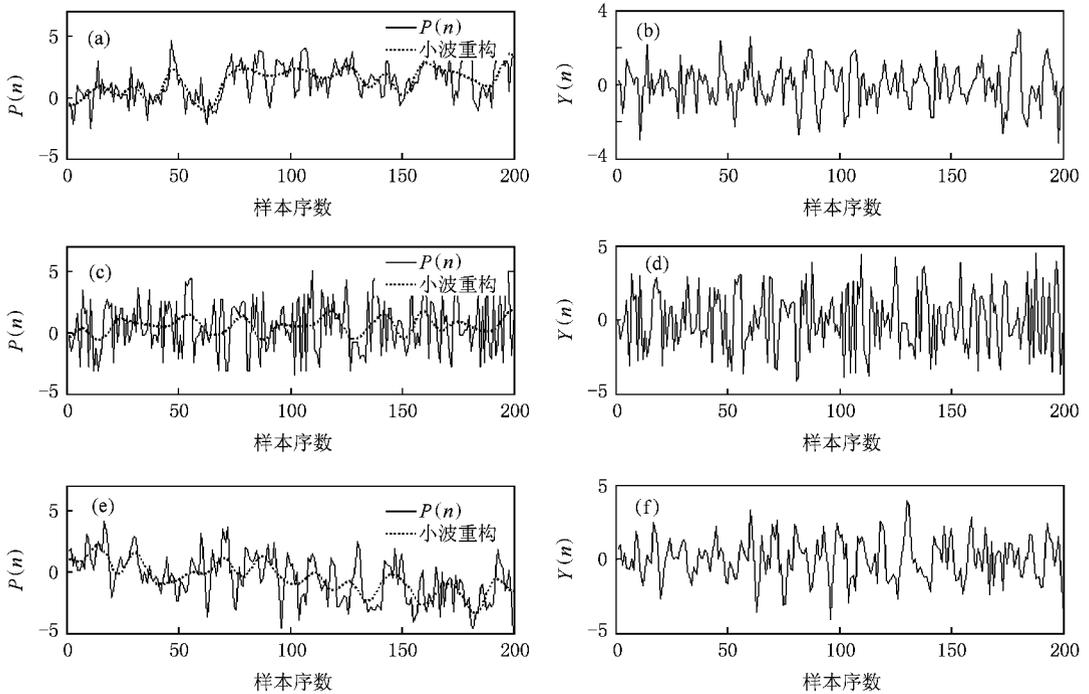


图 2 (a)(c)(e)分别为三座高炉样本“累计轮廓序列”的长期趋势小波重构图 ;(b)(d)(f)分别为三座高炉样本序列的波动成分

据此,如果可以找到合适的数值计算方法拟合出  $H(q)$ , 则就可以得出  $\tau(q)$  与  $q$  的关系;如果用

数值计算方法先拟合出  $\tau(q)$ , 亦可得出广义 Hurst 指数  $H(q)$ .

### 3.3. 多重分形谱

定义 2 给定函数  $X(t)$ , 假设它在  $t$  时刻的某个邻域有定义, 若  $\Delta t \rightarrow 0$  是, 函数的波动满足

$$|X(t + \Delta t) - X(t)| \sim C(\Delta t)^{\alpha(t)}, \quad (7)$$

则不断重复将区间  $[0, T]$  划分成  $b^k$  个等长的子区 ( $k$  为划分的阶段),  $N_k(\alpha)$  为 (第  $k$  阶段划分) 包含  $\alpha(t)$  的子区间个数, 若

$$f(\alpha) = \lim_{k \rightarrow \infty} \left( \frac{\log N_k(\alpha)}{\log(b^k)} \right), \quad (8)$$

在比一个点更大范围内有定义而且取正数, 那么  $X(t)$  是一个多重分形过程,  $\alpha(t)$  和  $f(\alpha)$  分别称为过程  $X(t)$  的 Holder 指数和多重分形谱。

在上述定义中, 局部 Holder 指数  $\alpha(t)$  的大小决定着炉温波动过程在某局部上的光滑或不规则程度, 连续变化的局部 Holder 指数, 描述了波动在不同时间局部上的不均匀性变化。多重分形的最深刻本质就是局部尺度特征的多样性, 也就是其 Holder 指数取值具有多样性。因此, 该定义从过程的局部行为特性出发提供了对多重分形过程更加直观的理解和解释。多重分形谱  $f(\alpha)$  表征了在炉温波动过程上随机抽取的时点具有 Holder 指数  $\alpha(t)$  的概率, 因而方便描述了 Holder 指数  $\alpha(t)$  的概率分布。这样, 多重分形谱就成为检测过程是否存在多重分形结构的有力工具。

## 4. 辨识算法设计

多重分形结构辨识一般的做法是寻找合适的算法拟合尺度函数  $\tau(q)$ , 再根据  $H(q) = [\tau(q) + 1]/q$  确定广义 Hurst 指数  $H(q)$ ; 根据  $f(\alpha) = \inf_{q \in \mathbb{R}} \{\alpha q - \tau(q)\}$  [17, 18] 解出多重分形谱  $f(\alpha)$ 。但是现有根据遍历性定理或热力学原理设计出来的估计  $\tau(q)$  的算法, 均有较强的前提条件, 即要求时间序列正规、严格平稳等, 所以对于实际生产过程获取的时间序列, 这样一类方法的仿真结果, 其可靠性分析方面的工作并不完善。

Kantelhardt 等人提出了一种新的多重分形分析方法 - 多重分形消除趋势波动分析法 (multifractal detrended fluctuation analysis, MF-DFA) [19], 此处的趋势消除本质上是序列某个小段的趋势消除, 而我们前面利用多分辨分析消除的序列的整体长期趋势, 这样做更有利于局部波动奇异性的辨识, 提高算法

的辨识灵敏度。MF-DFA 方法是 DFA 方法的推广, DFA 方法对于非平稳时间序列的处理, 其稳健性已得到广泛认同, 所以用 MF-DFA 可以对非平稳时间序列进行多重分形分析并取得稳健的效果。更重要的是, 对于正规的、平稳时间序列, Kantelhardt 证明了用 MF-DFA 方法得到的标度指数与用一般多重分形辨识框架得到的标度指数一致。借助 MF-DFA, 我们给出一种新的多重分形辨识框架, 基本辨识流程如下。

### 4.1. 用 MF-DFA 方法估计广义 Hurst 指数

对由 (3) 式确定的波动成分序列  $Y(n) \quad n = 1, 2, \dots, N-1$ :

1) 将序列  $\{Y(i)\}$  分成  $m$  个互不相交的区域, 每个区域均包含  $s$  个数据, 由于可能存在  $m \times s \neq N$ , 导致序列尾巴数据不能进入计算, 为此, 对序列  $\{Y(i)\}$  按索引  $i$  从小到大再由大到小各划分一次, 这样对于给定的  $s$ , 可以得到  $2m$  个小区间。

2) 对每个区间  $v \quad (v = 1, 2, \dots, 2m)$  里的  $s$  个点, 用最小二乘法进行  $k$  阶多项式拟合, 得到拟合方程:

$$\tilde{Y}_v(i) = \tilde{a}_0 + \tilde{a}_1 i + \tilde{a}_2 i^2 + \dots + \tilde{a}_k i^k. \quad (9)$$

3) 计算每个小区间的均方误差, 记为  $F^2(v, s)$ 。

当  $v = 1, 2, \dots, m$  时,

$$F^2(v, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{Y((v-1)s+i) - \tilde{Y}_v(i)\}^2. \quad (10)$$

当  $v = m+1, m+2, \dots, 2m$  时,

$$F^2(v, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{Y(N-(v-m)s+i) - \tilde{Y}_v(i)\}^2. \quad (11)$$

4) 定义  $q$  阶波动函数  $F_q(s)$  来描述所有子区间上均方误差的“均值”:

$$F_q(s) = \left\{ \frac{1}{2m} \sum_{v=1}^{2m} [F^2(v, s)]^{q/2} \right\}^{1/q}. \quad (12)$$

同前面 (4) (5) 式的结果类似, (12) 式直观物理意义是: 不同的  $q$  凸现出不同程度的波动对函数  $F_q(s)$  的影响, 我们通过两种特殊的情况来进一步说明 (12) 式描述过程的物理意义:

i. 当  $q < 0$  且  $|q| \gg 1$ , 较大的波动偏差  $F^2(v, s)$  经过  $q$  次幂后趋于 0, 在求和中几乎不起作用, 而那些较小的波动偏差起了决定性作用;

ii. 当  $q > 0$  且  $|q| \gg 1$ , 较小的波动偏差

$F^2(v, s)$  经过  $q$  次幂后趋于 0, 在求和中几乎不起作用, 而那些较大的波动偏差起了决定性作用.

与前面不同的是, 在均方误差  $F^2(v, s)$  的生成过程中, 借助每个小区间的回归多项式, 在此能将每小段的趋势消除掉, 更有利用局部波动奇异性的辨识.

当  $q = 0$  时 (12) 式没有定义, 由于我们最终关心的是  $H(q)$  与  $q$  的是否存在非线性相关性, 所以剔除  $q = 0$  点的值不加以考虑并不影响辨识结果, 所以在此不估计这一点的值.

5) 当  $\max(K + 2, 10) \leq s \leq N/4, F_q(s)$  与  $s$  呈现幂律增长关系, 即

$$F_q(s) \sim s^{H(q)} \quad (13)$$

进而可推出  $\lg F_q(s) = H(q) \lg s + C$ , 其中,  $H(q)$  就是广义 Hurst 指数, 通过在双对数图上作回归, 就可以得  $H(q)$  的估计. 当序列是理想单一分形过程时, 容易由上述过程推出  $H(q)$  为常数; 否则, 如果  $H(q) \sim q$  呈非线性关系, 则可推断序列存在多重分形结构.

### 4.2. 估计尺度函数

对于由定义 1 给出的多重随机过程, 其广义 Hurst 指数  $H(q)$  与尺度函数  $\tau(q)$  之间存在关系式  $H(q) = [\tau(q) + 1]q$ , 对于用 MF-DFA 方法估计出来的  $H(q)$  (为了避免混淆, 我们暂时将其记为  $\tilde{H}(q)$ ), 可以直接借用这一关系式子来求解  $\tau(q)$  吗? 为此, 我们将 (13) 式变形得

$$F_q(s) = \left\{ \frac{1}{2m} \sum_{v=1}^{2m} [\sqrt{F^2(v, s)}] \right\}^{1/q} \sim s^{\tilde{H}(q)}. \quad (14)$$

再将 (5) 式变形

$$\{E[|(X(t + \Delta t) - X(t))|^q]\}^{1/q} \sim (\Delta t)^{H(q)}. \quad (15)$$

这时候注意到 (14) 和 (15) 式左边“物理意义”是一样的, 不同的是局部波动的计算方法. 据此, 存在某个泛函  $\varphi$ : 使得  $\tilde{H}(q) = \varphi(H(q))$ , 函数  $\varphi$  的作用虽然使得相同的  $q$ , 一般不满足  $\tilde{H}(q) = H(q)$ , 但是  $H(q) \sim q$  的线性或非线性关系, 通过  $\varphi$  作用后依然在  $\tilde{H}(q) \sim q$  保持下来, 这才是我们真正关心的, 这说明 (14) 和 (15) 定义的广义 Hurst 指数本质上是一致的. 根据 (4), 从新定义尺度函数  $\tilde{\tau}(q)$ :

$$\left\{ \frac{1}{2m} \sum_{v=1}^{2m} [\sqrt{F^2(v, s)}] \right\}^q \sim s^{\tilde{\tau}(q)+1}. \quad (16)$$

同样的分析可以说明, 这样定义的尺度函数  $\tilde{\tau}(q)$  与 (4) 定义的尺度函数  $\tau(q)$ , 在刻画序列多重分形结构方面, 物理意义是一致的, 而对比 (14) 和 (16) 式, 得到

$$\tilde{\tau}(q) = q \times \tilde{H}(q) - 1. \quad (17)$$

### 4.3. 估计多重分形谱

Benzi, Paladin 等物理学家们提出<sup>[17]</sup>, 过程  $X(t)$  的多重分形谱  $f(a)$  可通过对尺度函数  $\tau(q)$  施行 Legendre 变换而估计得到的, 即

$$f(a) = \inf_{q \in \mathbf{R}} \{aq - \tau(q)\}. \quad (18)$$

尽管这样的变换式可以机械地解出来, 但是一个图形的描述更具直观意义. 对每个  $q$  值, 均可绘出一条斜率  $q$ , 截距为  $-\tau(q)$  的直线, 把所有这些直线绘在同一图形中, 最下面的边界就给出了所估计的多重分形谱. 因此, 利用所估计的尺度函数很容易转换成对多重分形谱的估计. 当多重分形谱中多于一个点时, 就认为具有多重分形特性.

## 5. 仿真结果及分析

利用上述算法, 对通过多分辨分析获取的三座高炉 [Si] 序列波动成分数据  $Y(n)$ , 分别进行广义 Hurst 指数仿真计算, 为了比较, 我们用 Matlab 中的 randn 函数生成一个长度为 1000 的高斯随机序列, 同样对其进行广义 Hurst 指数仿真计算. 选取  $s = 10, 11, \dots, 30; q = -10, -9.5, -9, \dots, 9, 9.5, 10$  ( $q$  不等于 0);  $k = 2$ . 之所以  $s$  选择这个范围, 是考虑到拟合点太少, 对规律把握不够, 太多的点又会带来过度拟合的问题.

从图 3 可以看出, 当  $q$  从 -10 变动到 10 时, 包钢 [Si] 序列样本的  $H(q)$  从 1.145 递减到 0.543, 邯钢 [Si] 序列样本的广义 Hurst 指数  $H(q)$  从 0.743 递减到 0.01, 莱钢 [Si] 序列样本的  $H(q)$  从 1.317 递减到 0.226, 而作为比对的随机序列, 其  $H(q)$  则在  $0.5 \pm 0.04$  之间反复振荡. 仔细分析仿真结果图, 可以得到以下结论.

第一, 三座不同高炉 [Si] 序列样本的广义 Hurst 指数  $H(q)$  均与  $q$  呈现反向关系并且显著不为常数,  $H(q)$  与  $q$  有关等价于  $F_q(s)$  与  $q$  有关, 即消除趋势后,  $v_s$  小段上的  $q$  阶波动大小不同, 说明时间序列局部结构是非均匀一致的, 这样的分形时间序列是多重分形的, 因此三座高炉 [Si] 序列均存在较

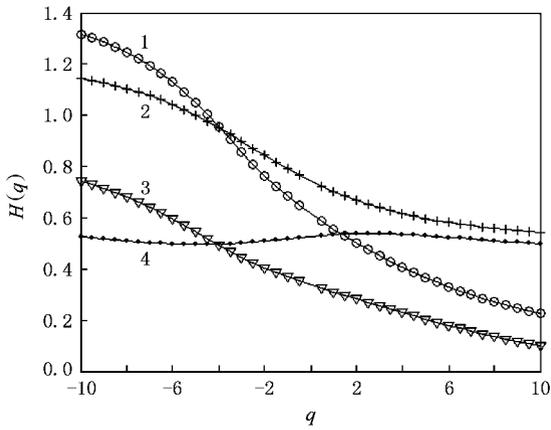


图3 三座高炉 Si 序列  $H(q)$  函数估计结果(曲线 1, 2, 3 分别为莱钢 1# ,包钢 6# 和邯钢 7# ,曲线 4 为随机序列)

明显的多重分形特征. 而对比的随机序列却不呈现反向关系, 而是在 0.5 附近波动. 完全随机序列的局部结构是均匀一致的, 这样的时间序列当然是(特殊的)单分形的.  $H(q)$  仅仅给出这一相同的标度行为. 理论上, 随机序列的  $H(q)$  就应该为 0.5, 由于 Matlab 产生的随机数本身就是伪随机数, 所以  $q$  从 -10 变到 10, 随机序列的  $H(q)$  在  $0.5 \pm 0.04$  之间波动是正常的.

第二, 通过多分辨分析提取 [Si] 序列样本波动成分, 再对其波动成分进行多重分形辨识, 辨识的灵敏度很高, 对比三座高炉  $H(q)$  的变动跨度, 包头 6# 炉的变动跨度最小, 约在 0.6, 邯钢 7# 炉的变动跨度约在 0.73, 而莱钢 1# 炉的变动跨度约在 1.08, 是最大的. 对比发现小高炉 [Si] 序列的局部“波动层次”多, 波动不同局部的奇异强度大, 多重分形特征更加明显, 在调控炉温发展的过程中, 其突变的概率比大高炉大.

第三, 高炉炉温 [Si] 序列不但从整体上体现出单分形特征, 而且在局部奇异性检测时表现出明显多重分形特性, 即便像包钢 6# 炉这样的  $2500\text{m}^3$  大高炉, 炉温发展的局部奇异性依然显著存在, 要理想拟合、预报并控制高炉炉温, 难度是非常大的, 基于非线性分析的分形、混沌等相关理论和应用的研究, 应该是解决问题的一个让人兴奋的努力方向.

图 4 给出了三座高炉 [Si] 序列尺度函数  $\tau(q)$  与  $q$  的关系拟合图. 从图可以看出,  $\tau(q)$  均为上凸的, 并且  $\tau(q) \sim q$  非线性关系明显, 这种非线性关系的存在成为高炉 [Si] 序列具有多重分形特征的

有力佐证. 图 5, 6, 7 分别给出了它们的多重分形谱  $f(a)$  的估计结果, 图中“\*”勾画出来的曲线段就是多重分形谱函数  $f(a)$  的大致图形. 从多重分形谱图上可知, 局部 Holder 指数在较大范围内变化, 由此也说明高炉 [Si] 序列波动过程是一个多重分形过程.

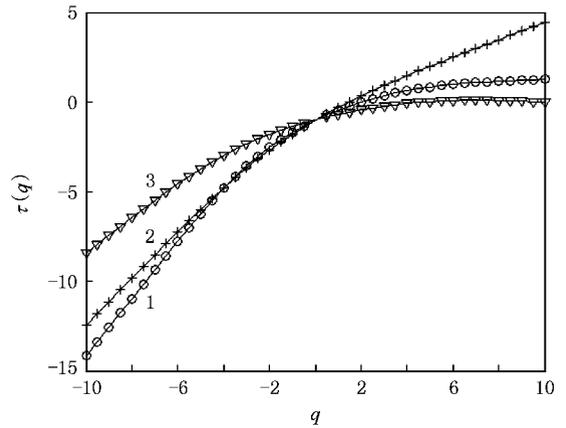


图4 三座高炉 Si 序列波动尺度函数拟合图(曲线 1, 2, 3 同图 3)

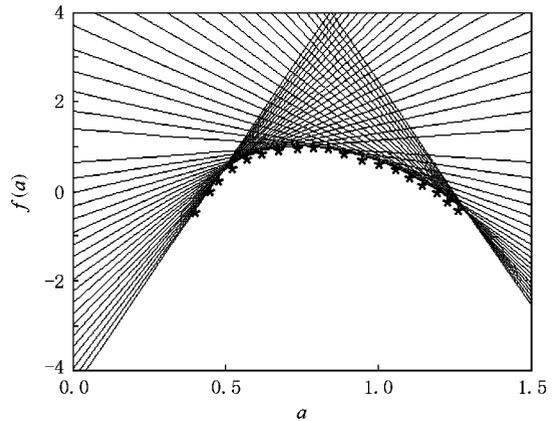


图5 包钢数据多重分形谱估计

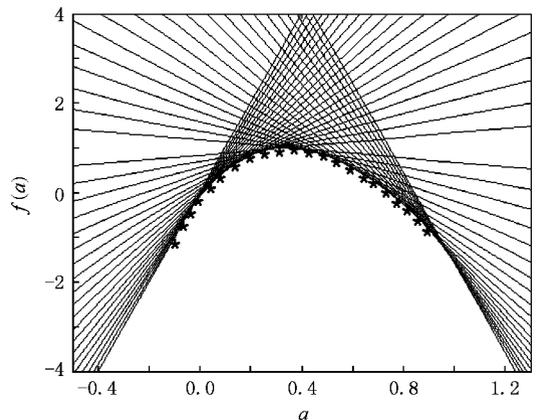


图6 邯钢数据多重分形谱估计

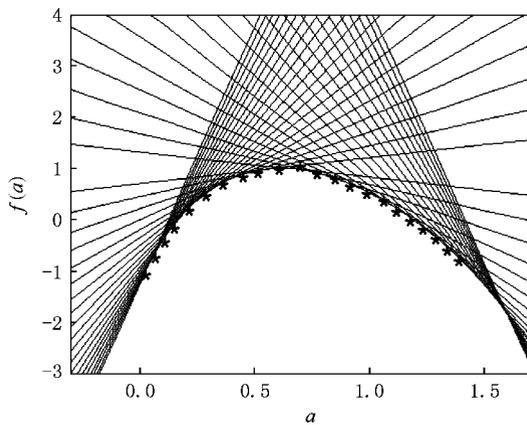


图7 莱钢数据多重分形谱估计

## 6. 结论与展望

本文主要有以下几个方面的结论：

1) 用多分辨小波分析提取[Si]序列不同层次波动成分, 算法效率高; 2) 给出了改进后的重分形特征辨识框架, 辨识结果灵敏可靠; 3) 通过对3座

不同容积高炉的样本进行仿真计算, 其广义 Hurst 指数、尺度函数、多重分形谱均表现出明显时变特征, 证明高炉炉温波动过程具有显著多重分形结构特征; 4) 小高炉铁水硅 [Si] 序列的局部“波动层次”多, 波动不同局部的奇异强度大, 在调控炉温发展的过程中, 其突变的概率比大高炉大; 5) 即便像包钢 6# 炉这样的 2500m<sup>3</sup> 大高炉, 炉温发展的局部奇异性依然显著存在。

本文的研究表明, 基于正态分布、序列不相关、单一分形等传统假设下建立的相关炉温波动理论和方法需要补充和修正。后续研究我们将主要向以下方向推进：

1) 将多重分形辨识获取的局部量化参数与现有的铁水硅 [Si] 序列拟合、预报模型相结合, 期待获取普适、稳定、自适应性强的高命中率模型; 2) 将多重分形分析的方法运用到高炉冶炼过程的其他关键参数(比如, 风量、透气性等)的时间序列分析当中, 挖掘出其内在规律, 并将这些影响冶炼过程的关键状态和控制量进行非线性融合, 尝试建立高炉冶炼过程的闭环控制模型。

[ 1 ] Muchi I, Yagi J, Tamura K, Moriyama A 1966 *Jpn. Inst. Met.* **4** 826  
 [ 2 ] Zhao M, Liu X G, Gao C H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2722 ( in Chinese ) [ 赵 敏、刘祥官、诰传厚 2008 物理学报 **57** 2722 ]  
 [ 3 ] Gao C H, Zhou Z M, Shao Z J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1490 ( in Chinese ) [ 郜传厚、周志敏、邵之江 2005 物理学报 **54** 1490 ]  
 [ 4 ] Gao C H, Zhou Z M 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4092 ( in Chinese ) [ 郜传厚、周志敏 2004 物理学报 **53** 4092 ]  
 [ 5 ] Miyano T, Kimoto S, Shibuta H *et al* 2000 *Physica D* **135** 305  
 [ 6 ] Chen J 2001 *Eng. Appl. Artif. Intell.* **14** 77  
 [ 7 ] Waller M, Saxen H 2002 *ISIJ Int.* **42** 316  
 [ 8 ] Jiménez J, Mochón J, Ayala J S *et al* 2004 *ISIJ Int.* **44** 573  
 [ 9 ] Luo S H, Liu X G 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3343 ( in Chinese ) [ 罗世华、刘祥官 2006 物理学报 **55** 3343 ]  
 [ 10 ] Luo S H, Liu X G, Zeng J S 2007 *ISIJ Int.* **47** 1102  
 [ 11 ] Manimaran P, Panigrahi P K, Parikh J C 2005 *Phys. Rev. E* **72** 046120

[ 12 ] Manimaran P, Panigrahi P K, Parikh J C 2006 *Europhysics Letters* Preprint : arXiv :lin/0601074v1  
 [ 13 ] Fisher A, Calvet L, Mandelbrot BB 1997 *Yale University* : Working Paper  
 [ 14 ] Mandelbrot B B, Fisher A, Calvet L 1997 *Yale University* : Working Paper  
 [ 15 ] Calvet L, Fisher A, Mandelbrot B B 1997 *Yale University* : Working Paper  
 [ 16 ] Li T, Shang P J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4393 ( in Chinese ) [ 李 彤、商朋见 2007 物理学报 **56** 4393 ]  
 [ 17 ] Halsey T C, Jensen M H *et al* 1986 *Phys. Rev. A* **33** 1141  
 [ 18 ] Wen Z Y, Fan A H *et al* 1998 *The theory and applications of fractal* ( Hangzhou : Zhejiang Scin-tech. Press ) p8 ( in Chinese ) [ 文志英、范爱华等 1998 分形几何理论 ( 杭州 : 浙江科学技术出版社 ) 第 8 页 ]  
 [ 19 ] Kantelhardt J W, Stephan A Z *et al* 2002 *Physica A* **316** 87

# Multi-fractal identification of the fluctuation of silicon content in blast furnace hot metal based on multi-resolution analysis<sup>\*</sup>

Luo Shi-Hua<sup>1)†</sup> Zeng Jiu-Sun<sup>2)</sup>

1) *School of Information Management, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China*

2) *The Institute of System Optimum Technique, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*

( Received 19 June 2008 ; revised manuscript received 8 August 2008 )

## Abstract

With data of silicon content in hot metal collected respectively from No. 6 blast furnace of Baotou Steel, No. 7 blast furnace of Handan Steel and No. 1 blast furnace of Laiwu Steel as sample spaces, quantitative analysis was employed to identify the multi-fractal characteristics of silicon content series. The long term trend of silicon content series was removed by performing multi-resolution analysis and the multi-fractal characteristics of the remaining part was analyzed. Comprehensive and quantitative details of the partial fluctuant singularity and fluctuant singularity at different levels are displayed through computation of generalized Hurst index, scaling function and multi-fractal spectrum. Simulation results proved that the fluctuation of silicon content series from 3 different blast furnaces showed significant multi-fractal characteristics, which is far from sufficient to be described by a single Hurst index or box dimension.

**Keywords** : multi-resolution analysis, silicon content in hot metal, fluctuations, multi-fractal

**PACC** : 0555, 0540

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Science Foundation of China ( Grant Nos. 60775038, 10701040 ), the Foundation of the Office of Education, Jiangxi Province ( Grant Nos. GJJ08358, GJJ08359 ) and the Foundation of Jiangxi University of Finance Economics.

<sup>†</sup> E-mail : luoshihua110@yahoo.com.cn